

На правах рукописи



КОРНИЕНКО СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Волгоград — 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Научный консультант
доктор технических наук,
профессор

Перехоженцев Анатолий Георгиевич
профессор кафедры «Архитектура зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Ананьев Алексей Иванович
главный научный сотрудник ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН)

доктор технических наук

Васильев Григорий Петрович
научный руководитель открытого акционерного общества «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»

доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
член-корреспондент Академии военных наук РФ

Куколев Максим Игоревич
профессор кафедры «Гидравлика и прочность» ИСИ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Защита диссертации состоится 26 декабря 2018 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.028.10 при ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, ауд. Б–203.

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-библиотечном центре и на сайте ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

Автореферат разослан 15 октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронкова Галина Вячеславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Сокращение энергетических природных запасов ставит остро проблему энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий. Решение этой проблемы тесно связано с повышением требований к качеству проектирования зданий, поскольку ошибки проектирования приводят к снижению теплозащитных свойств ограждающих конструкций и повышают энергозатраты на эксплуатацию здания.

Выбор рационального конструктивного решения на стадии проектирования связан с проблемой исследования процессов теплообмена, прогноза температурно-влажностного режима ограждающих конструкций и повышения точности теплотехнических расчетов, поскольку температурно-влажностный режим ограждений непосредственно влияет на микроклимат помещений, теплозащитные свойства, надежность и экологическую безопасность зданий.

Наиболее сложным является прогноз температурно-влажностного режима в теплотехнически неоднородных участках ограждений (краевых зонах), в которых перенос теплоты и влаги происходит по двух- и трехмерной схемам. Более 40% общих тепловых потерь ограждения отмечается через краевые зоны. Локализация влаги на этих участках выше допустимых значений приводит к ухудшению влажностного режима, снижая теплозащиту и срок эксплуатации всего здания. Вместе с тем, отсутствие современных методов расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций, удобных для практического применения, затрудняет оценку влияния краевых зон на теплозащиту и энергоэффективность зданий.

Таким образом, проблема энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий приводит к необходимости исследования процессов теплообмена и разработки методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций. Этим определяется актуальность проблемы *повышения теплозащиты и энергоэффективности зданий в условиях отсутствия научно-методического аппарата по формированию требований к ограждающим конструкциям с учетом особенностей температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений.*

Цель работы — разработка научно обоснованных методов прогноза температурно-влажностного режима с учетом процессов влаготеплопереноса в краевых зонах ограждающих конструкций при оценке тепловой защиты и энергоэффективности зданий.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать теоретические основы состояния и переноса влаги в материалах ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при неизотермических условиях увлажнения.

2. Разработать методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждающих конструкций в широком диапазоне

влажности материалов при стационарных граничных условиях, доступные широкому кругу проектировщиков.

3. Разработать метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе математической модели совместного нестационарного тепловлагопереноса.

4. Выполнить оценку влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций на микроклимат помещений, теплозащитные свойства и энергоэффективность зданий.

Методы исследования:

- комплекс существующих базовых методов на основе развития теории потенциала влажности;
- метод сушки для лабораторного исследования характеристик влагопереноса в материалах ограждений;
- математическое моделирование процесса совместного нестационарного тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях;
- метод конечных разностей для численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепловлагопереноса в ограждениях;
- экологически безопасные методы неразрушающего контроля для натуральных эксплуатационных исследований параметров микроклимата помещений, температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств ограждений;
- вероятностно-статистические методы обработки результатов экспериментальных исследований теплофизических свойств материалов и конструкций.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Теоретические основы состояния и переноса влаги в материалах ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при неизотермических условиях увлажнения с применением энергетической шкалы абсолютного потенциала влажности.

2. Методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности материалов при стационарных граничных условиях: расчет профиля влагосодержания, определение плоскости наибольшего увлажнения, расчет конструкции по предельно допустимому состоянию увлажнения.

3. Метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе математической модели совместного нестационарного тепловлагопереноса.

4. Методики расчета теплозащитных и энергетических характеристик здания за отопительный период с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций.

Степень достоверности и обоснованность научных положений, выводов и результатов подтверждается:

- значительным объемом многолетних натуральных исследований параметров микроклимата помещений, температурно-влажностного режима и тепло-

защитных свойств ограждающих конструкций, результатов анализа теплоэнергетических показателей зданий, выполненных автором с применением высокоэффективного сертифицированного оборудования, обеспечивающего необходимую точность измерений;

- обеспечением повторяемости полученных результатов экспериментальных наблюдений;
- соответствием полученных автором теоретических данных с экспериментальными данными;
- верификацией разработанного в диссертации метода численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного теплообмена в ограждающих конструкциях различными способами;
- согласованностью полученных в диссертации основных результатов исследований с данными других авторов.

Новизна научных положений состоит в том, что:

- установлена научно обоснованная связь между существующими шкалами потенциала влажности применительно к материалам ограждений, что способствует дальнейшему развитию теории потенциала влажности и получению новых результатов по теме диссертации;
- разработана новая энергетическая шкала абсолютного потенциала влажности, определяющая влажностное состояние материалов в неизотермических условиях в широком диапазоне влажности, включая сверхсорбционное увлажнение материалов;
- предложена экспресс-методика экспериментального определения характеристик переноса влаги (потенциалопроводности, влагопроводности и коэффициента влагообмена) путем сушки разрезных образцов влажных материалов от полного водонасыщения, позволяющая более точно определить из одного опыта все искомые характеристики влагопереноса;
- разработаны научно обоснованные методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждающих конструкций на основе шкалы абсолютного потенциала влажности при стационарных граничных условиях, достоинством которых являются возможность оценки в широком диапазоне влажности (с количественной оценкой степени переувлажнения материалов), применимость к расчету ограждений с мультizonальной конденсацией влаги;
- разработан новый метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе нелинейной математической модели совместного нестационарного теплообмена с применением шкалы абсолютного неизотермического потенциала влажности, позволяющей упростить модель и построить эффективный алгоритм решения задачи;
- раскрыты сложные механизмы локализации теплоты и влаги в многомерных элементах ограждений, физически обусловленные неоднородностью конструкции и нелинейностью процесса теплообмена, приводящие

к ухудшению параметров микроклимата помещений, температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств ограждений;

- предложены методики расчета теплозащитных и энергетических характеристик здания за отопительный период с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций;
- на основе применения разработанных в диссертации методов доказано, что снижение тепловых потерь в краевых зонах ограждений имеет высокий потенциал энергосбережения.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», поскольку процессы теплообмена в ограждающих конструкциях, обеспечивающих защиту от внешних неблагоприятных климатических воздействий, непосредственно влияют на температурно-влажностный режим в помещениях зданий, распределяя температуру и влажность на внутренней поверхности ограждений, и создают вместе с инженерными системами надлежащий микроклимат помещений. Область исследования диссертации соответствует п. 5 «Тепловой, воздушный и влажностный режимы зданий различного назначения, *теплообмен в ограждениях и разработка методов расчета энергосбережения в зданиях*» паспорта специальности.

Личный вклад автора состоит в его определяющем участии на всех этапах работы: постановке и обосновании цели и задач исследований, в формулировке теоретических положений и разработке методов расчета температурно-влажностного режима ограждений. Все методы расчета реализованы в разработанных автором компьютерных программах, имеющих государственную регистрацию. Для верификации разработанных в диссертации методов расчета автором выполнены комплексные натурные исследования с применением современных методов неразрушающего контроля. Личный вклад соискателя подтверждается многочисленными публикациями в период с 2000 года по настоящее время, выполненными преимущественно без соавторов. В диссертации отсутствуют заимствованные материалы без ссылок на автора и (или) источник заимствования.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработаны и внедрены программно-вычислительный комплекс «ЭНТЕЗА», все программы которого зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ Федерального института промышленной собственности и использованы на многочисленных объектах жилищно-гражданского и производственного назначения; РМД 51–25–2015 «Рекомендации по проектированию и монтажу фасадных систем для нового строительства и реконструкции жилых и общественных зданий в Санкт-Петербурге» (в соавторстве); СТО 03984362.574100.056–2015 (ООО «ЛСР. Стеновые–СЗ») и СТО 73090654.001–2015 (ООО «КНАУФ Инсулейшн») по оценке влажностного режима ограждающих конструкций в годовом цикле; «Альбом технических решений тепло- и звукоизоляции ограждающих конструкций жилых, общественных и производственных зданий и сооружений на ос-

нове изделий из стеклянного штапельного волокна КНАУФ Инсулейшн» (в соавторстве) и другие нормативно-инструктивные документы;

- определены области перспективного практического использования разработанных теоретических основ и методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты;
- создана система практических рекомендаций по повышению уровня тепловой защиты и энергоэффективности зданий с учетом особенностей температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений помещений для учебных, проектных и производственных организаций;
- представлен научно-методический аппарат по формированию требований к ограждающим конструкциям с учетом особенностей температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений, результаты апробации и внедрения которого позволяют рекомендовать его для использования в практике работы организаций и предприятий, занимающихся теоретическими и прикладными исследованиями в области тепловой защиты зданий, а также при подготовке специалистов по направлению «Строительство и архитектура».

Реализация результатов работы. Результаты диссертации внедрены и использованы более чем на 30 объектах гражданского и промышленного строительства, в том числе при оценке теплотехнического состояния несущих конструкций стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов производственных объектов ОАО «Самотлорнефтегаз»; разработке трехслойных стеновых панелей с дискретными связями в виде керамзитобетонных шпонок для жилых зданий серии «Дом–2000 КП» (ОАО «ВЗ ЖБИ–1»); мониторинге температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств многоквартирных жилых зданий в Волгоградской области (АНО «Профессиональная экспертиза»); разработке и теплоэнергетическом сопровождении раздела «Энергоэффективность» серии проектов энергоэффективных зданий в г. Волгограде (ООО «Универсалпроект»); реконструкции храма Сергия Радонежского в г. Волгограде (Московский Патриархат).

Технико-экономический эффект от внедрения результатов работы обусловлен повышением качества проектирования, строительства и эксплуатации зданий.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях НИИСФ РААСН (Москва, 1997—2003); 3-й международной научно-практической конференции «Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов» (Пенза, 2001); международной научно-практической конференции «Рациональные энергосберегающие конструкции, здания и сооружения в строительстве и коммунальном хозяйстве» (Белгород, 2002); международной научно-практической конференции «Строительство–2003» (Ростов н/Д, 2003); международном форуме по проблемам науки, техники и образования (Москва, 2003); международной научно-практической конференции «Акту-

альные проблемы развития АПК» (Волгоград, 2005); научно-технической конференции «Строительная физика в XXI веке», посвященной 50-летию НИИСФ РААСН (Москва, 2006); международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (Пенза, 2007); 64-й научно-технической конференции НГАСУ (Сибстрин) (Новосибирск, 2007); международных научно-технических конференциях «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» МГСУ (Москва, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015); ежегодных академических чтений НИИСФ–МГСУ, посвященных памяти академика РААСН Г.Л. Осипова (Москва, 2009—2017); международном конгрессе, посвященном 180-летию СПбГАСУ «Наука и инновации в современном строительстве» (Санкт-Петербург, 2012); международной конференции МГСУ «Строительная физика. Системы обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях» (Москва, 2014); международном конгрессе «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий» (Санкт-Петербург—Москва, 2014—2018); международных конференциях СПбПУ Петра Великого (Санкт-Петербург, 2014—2018); международной конференции «Биоповреждение строительных конструкций» (Санкт-Петербург, 2017); научно-технической конференции «Техногенная энергобезопасность и энергоресурсосбережение» (Москва, 2018); ежегодных научно-практических конференциях ВолГГТУ.

Публикации. Основные научные результаты диссертации **опубликованы** в монографиях, статьях, свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, депонированных в ВИНТИ РАН рукописях работ, материалах всероссийских и международных конференций, электронных научных изданиях, всего в 153 работах, из них 75 работ в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК, 8 работ в изданиях, включенных в международные базы научного цитирования Web of Science и SCOPUS.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, приложений и библиографического списка, включающего 420 источников. Общий объем работы 380 страниц; основной текст изложен на 316 страницах, включая 97 иллюстраций и 45 таблиц.

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель, идея и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна. Подтверждены личный вклад автора, практическая значимость и реализация результатов работы. Даны сведения об апробации работы и публикациях автора.

В первой главе «Обзор методов оценки энергоэффективности зданий. Анализ математических моделей и методов расчета тепловлагоденоса в ограждающих конструкциях» проведен обзор существующих методов оценки энергоэффективности зданий, дан анализ математических моделей и методов расчета процесса тепловлагоденоса в ограждениях. Отмечается значительный вклад в решение этой проблемы ведущих российских научных школ, а также зарубежных специалистов.

Выполненный обзор методов оценки энергоэффективности зданий показал, что указанные методы не учитывают влияние процессов теплообмена в краевых зонах ограждающих конструкций на микроклимат помещений, теплозащитные свойства и энергоэффективность зданий ввиду отсутствия метода расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях наружных ограждений. Между тем, как показывает практика, именно в краевых зонах ограждающих конструкций зачастую отмечается ухудшение температурно-влажностного режима, что приводит к снижению теплозащиты всего здания.

С проблемой энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий тесно связана разработка теории и методов расчета тепловлажностного режима ограждающих конструкций. Большой вклад в решение данной проблемы внесли В.Н. Богословский, А.В. Лыков, К.Ф. Фокин, А.У. Франчук, В.Д. Мачинский, В.И. Лукьянов, С.В. Александровский, В.М. Ильинский, В.Г. Гагарин, А.И. Ананьев, С.В. Федосов, В.Н. Куприянов, С.П. Рудобашта, А.Г. Перехоженцев, Е.И. Тертичник, O. Krischer, K. Gertis, L.G. Miller, H. Glaser, K. Kießl, H.M. Künzle, H.W. Woolley и другие ученые.

Для анализа сложных процессов влагопереноса в ограждениях наиболее удобна математическая модель, основанная на потенциале влажности. В отличие от теплового потенциала (температуры) существуют различные подходы к определению потенциала влажности. Наиболее общая оценка влажностного режима наружных ограждений может быть получена на основе теории потенциала влажности, разработанной В.Н. Богословским. При использовании этой модели можно рассматривать процесс влагообмена в широком диапазоне влажности и температуры с учетом перемещения влаги в парообразном и жидком состояниях под действием различных сил. Физико-математическое обоснование метода «потенциала влажности» дано в работах А.В. Лыкова где подчеркнута единство явлений тепло- и массообмена. Это позволяет строить математические модели влагопереноса в ограждающих конструкциях, используя известные методы теории теплопроводности.

На основании выполненного обзора методов оценки энергоэффективности зданий и анализа математических моделей и методов расчета тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе «Характеристики состояния влаги в материалах ограждающих конструкций» разработаны теоретические основы состояния влаги в строительных материалах на основе потенциала влажности.

Третья глава «Характеристики переноса влаги в материалах ограждающих конструкций» содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований характеристик влагопереноса в строительных материалах на основе потенциала влажности.

Разработанные в диссертации теоретические основы состояния и переноса влаги в материалах ограждающих конструкций использованы при разработке методов расчета температурно-влажностного режима ограждений.

В четвертой главе «Инженерные методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций» разработаны методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждений в широком диапазоне влажности при стационарных граничных условиях на основе теории потенциала влажности.

В пятой главе «Метод численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях» разработан метод расчета температурно-влажностного режима для трехмерных областей ограждений, включая построение математической модели, численное решение задачи, алгоритм и компьютерную программу расчета трехмерных нестационарных температурных и влажностных полей.

Шестая глава «Тестирование метода численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях» содержит результаты верификации указанного метода расчета различными способами.

В седьмой главе «Оценка влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций на теплозащиту зданий» на основе методики расчета, разработанной в диссертации, показано существенное влияние температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений на теплозащитные свойства оболочки зданий. Даны практические рекомендации по проектированию ограждающих конструкций современных зданий с учетом температурно-влажностного режима.

Восьмая глава «Энергоэффективность и ее повышение за счет снижения теплопотерь в краевых зонах ограждающих конструкций оболочки здания» содержит методику расчета энергетических показателей зданий за отопительный период, реализованную в компьютерной программе. Выполнена оценка энергоэффективности жилого здания по результатам энергоаудита. Намечены пути повышения энергоэффективности за счет снижения потерь теплоты через оболочку зданий.

В заключении сформулированы общие выводы по диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Теоретические основы состояния и переноса влаги в материалах ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при неизотермических условиях увлажнения с применением энергетической шкалы абсолютного потенциала влажности.

На основе термодинамического анализа процессов переноса влажного пара в материалах ограждающих конструкций разработана энергетическая шкала абсолютного потенциала влажности, определяемого по формуле:

$$\theta = -135,3 \ln(1 - \varphi), \quad (1)$$

где $\varphi = p/p_s$ — относительное парциальное давление водяного пара в материале при эталонной температуре $t_0 = 20$ °С.

Абсолютный потенциал влажности, определяемый формулой (1), показывает изменение удельной энергии системы «влажный материал–воздух» при изменении парциального давления водяного пара в материале по сравнению с давлением насыщенного водяного пара при эталонной температуре.

Формула (1) получена на основе фундаментального адсорбционного уравнения Гиббса применительно к влажному материалу. Как и для абсолютного потенциала влагопереноса А.Г. Перехоженцева, в качестве определяющего параметра для этого потенциала принято изменение парциального давления водяного пара в материале по сравнению с давлением насыщенного водяного пара ($1 - p/p_s$). В отличие от абсолютного потенциала влагопереноса А.Г. Перехоженцева потенциал θ определен при эталонной температуре.

Если влажное тело имеет произвольную температуру, то его абсолютный потенциал влажности равен абсолютному потенциалу влажности тела, которое находится с ним в состоянии неизотермического влажностного равновесия и имеет эталонную температуру $t_0 = 20$ °С. Это положение следует из первого закона теории потенциала влажности В.Н. Богословского и определения абсолютного потенциала влажности, данного формулой (1).

Определение абсолютного потенциала влажности исключает влияние вида материала и температуры, что полностью согласуется с идеей В.Н. Богословского, положенной в основу определения экспериментального (полного) потенциала влажности Θ_B .

Аналогично влажному материалу абсолютный потенциал влажности воздуха определяется по формуле (1), в которой в качестве φ принимается относительная влажность воздуха. В состоянии влажностного равновесия между материалом и окружающей его воздушной средой абсолютные потенциалы влажности материала и воздуха равны.

На основе теории капиллярной конденсации влаги в материале установлены границы шкалы абсолютного потенциала влажности при эталонной температуре. В области капиллярной конденсации влаги выделены три зоны: *A* — адсорбционно-капиллярная (сорбционная) при $48,2 \leq \theta < 436$ кДж/кг; *B* — массовой капиллярной конденсации при $436 \leq \theta \leq 717$ кДж/кг; *C* — капиллярно-насыщенная при $717 < \theta \leq 1246$ кДж/кг. На основе предложенного в диссертации зонирования установлена зависимость равновесного влагосодержания материалов от абсолютного потенциала влажности при эталонной температуре $w(\theta)_{ю}$, которая является обобщением изотермы сорбции-десорбции на весь участок увлажнения материала.

В диссертационной работе установлена научно обоснованная связь между различными шкалами потенциала влажности, что способствует дальнейшему развитию теории потенциала влажности и получению новых результатов по теме диссертации.

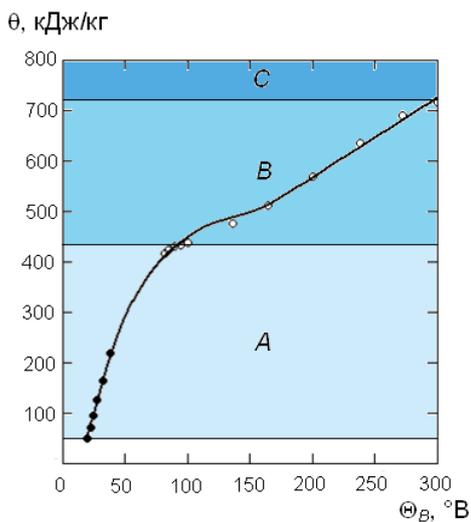


Рис. 1. Связь между потенциалами влажности θ и Θ_B

На основе установленной связи между абсолютным потенциалом влажности θ и экспериментальным потенциалом влажности В.Н. Богословского Θ_B показано (рис. 1), что абсолютный потенциал влажности, разработанный автором, характеризует влажностное состояние материалов и воздушной среды в неизотермических условиях (рис. 2).

График зависимости $\varphi(\theta, t)$ построен на основании установленных в диссертации зависимостей $\Theta_B(\Theta_L, t)$, $\theta(\Theta_B)$ и экспериментально полученной зависимости $\varphi(\Theta_L)$. График зависимости $w(\theta, t)$ построен на основании зависимостей $\Theta_B(\Theta_L, t)$, $\theta(\Theta_B)$ и $w(\Theta_L)$.

Установленная в диссертации связь между различными шкалами потенциала влажности позволяет строить зависимости равновесного влагосодержания в шкале абсолютного потенциала влажности при разных температурах для широкого круга материалов.

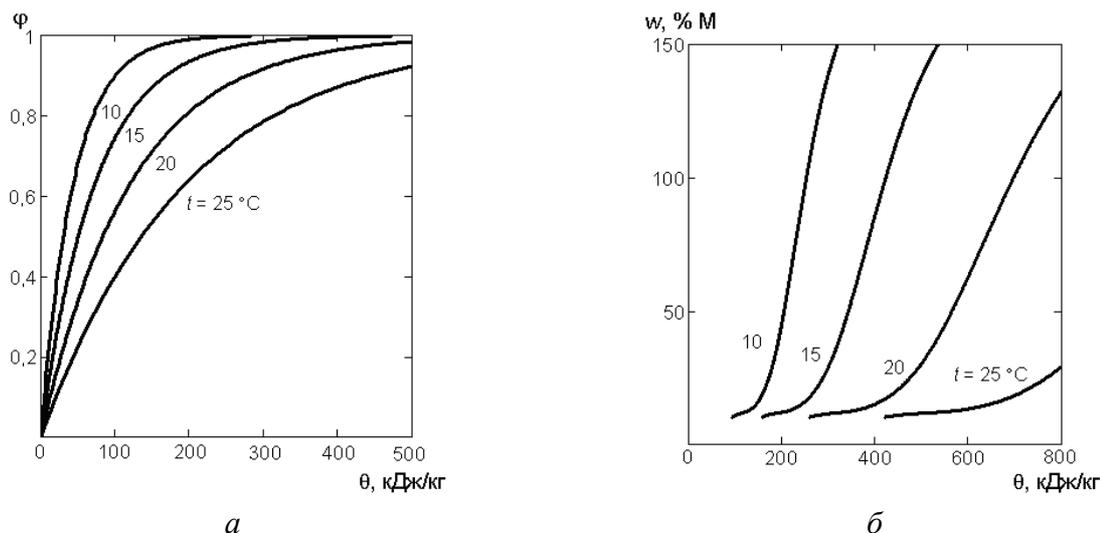


Рис. 2. Графики зависимостей $\varphi(\theta, t)$ для воздуха (а) и $w(\theta, t)$ для газосиликата (б)

Сложность зависимостей $w(\theta, t)$ и $\varphi(\theta, t)$ вызывает затруднения в применении шкалы θ для оценки влажностного состояния ограждающих конструкций и воздушной среды. Возникает необходимость в показателе, однозначно определяющем влажностное состояние материала и воздушной среды. С этой целью определен относительный потенциал влажности материала (воздуха) θ_φ по формуле:

$$\theta_\varphi = \frac{\theta}{\theta_{m.s}}, \quad (2)$$

где θ — абсолютный потенциал влажности материала (воздуха) при данном температурно-влажностном состоянии; $\theta_{m.s}$ — абсолютный потенциал влаж-

ности материала (воздуха) при той же температуре, соответствующий максимальному сорбционному влагосодержанию материала при $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (относительной влажности воздуха $\varphi = 0,96$).

На основе определения множества значений потенциала, соответствующих $\varphi = 0,96$ при разных температурах, путем аппроксимации данных методом наименьших квадратов получена зависимость $\theta_{m.s}(t)$ при $-20 \leq t \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\theta_{m.s}(t) = \frac{5314}{1 + 107,08 \exp(-0,106 t)}. \quad (3)$$

Погрешность аппроксимации данных функцией (3) не превышает 10%.

На основании зависимости $\varphi(\theta, t)$ и определения θ_φ по формуле (2) получена зависимость $\varphi(\theta_\varphi, t)$. Из графика зависимости $\varphi(\theta_\varphi, t)$ видно (рис. 3, а), что температура оказывает незначительное влияние на изменение относительной влажности воздуха в шкале относительного потенциала влажности.

Это обстоятельство позволяет определить зависимость $\varphi(\theta_\varphi)$ формулой:

$$\varphi(\theta_\varphi) = 1 - \exp(-3,219 \theta_\varphi). \quad (4)$$

График зависимости (4) показан жирной линией на рис. 3, а. Аналогично установлена зависимость $w(\theta_\varphi, t)$ для материалов. По графику зависимости $w(\theta_\varphi, t)$ для газосиликата (рис. 3, б) видно, что, как и для воздуха, температура оказывает незначительное влияние на изменение равновесного влагосодержания материала в шкале относительного потенциала влажности. Поэтому влиянием температуры на изменение w в шкале θ_φ можно пренебречь и определить зависимость $w(\theta_\varphi)$ при эталонной температуре (жирная линия).

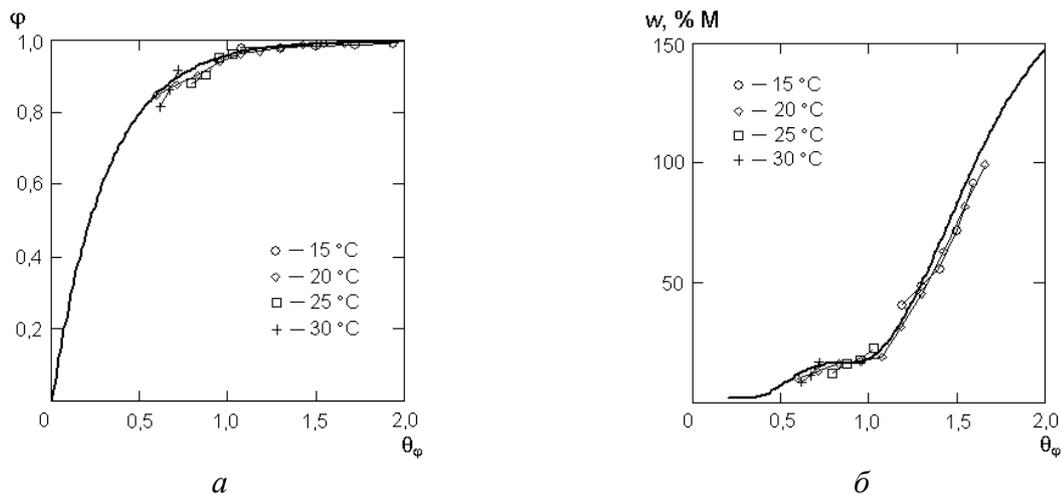


Рис. 3. Графики зависимостей $\varphi(\theta_\varphi, t)$ для воздуха (а) и $w(\theta_\varphi, t)$ для газосиликата (б)

Таким образом, относительный потенциал влажности является обобщенным показателем, удобным для оценки влажностного состояния материалов и воздушной среды.

Для решения нестационарных задач влагопереноса используется показатель влагоемкости материала, определяемый в шкале потенциала влажности.

Разработана экспресс-методика экспериментального определения характеристик переноса влаги, суть которой заключается в определении нестационарного поля влагосодержания $w(x, \tau)$ в разрезной колонке из исследуемого материала путем сушки влажного образца от полного водонасыщения до равновесного влагосодержания с окружающей средой. Влагоизолированную с торцов колонку, состоящую из предварительно увлажненных образцов материала, помещают в термостат и подвергают двусторонней сушке. Поле влагосодержания $w(x, \tau)$ в колонке определяют измерением влагосодержания в различных слоях с течением времени. По известному полю влагосодержания определяют искомые характеристики влагопереноса — потенциалопроводность влаги в материале, влагопроводность и коэффициент влагообмена. Погрешность измерений экспресс-методом не превышает 15%.

По указанной методике проведены экспериментальные исследования характеристик влагопереноса при эталонной температуре для ряда строительных материалов, широко применяемых в практике строительства: газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$), силикатного кирпича ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$), керамического кирпича ($\rho_0 = 1700 \text{ кг/м}^3$), цементно-песчаного раствора ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$). На основе статистической обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получены экспоненциальные зависимости потенциалопроводности от влагосодержания для указанных материалов:

$$a_m(w) = a \exp(bw), \quad (5)$$

где a, b — эмпирические коэффициенты: для газосиликата — $a = 5,084 \cdot 10^{-11}$, $b = 1,837$; для силикатного кирпича — $a = 1,098 \cdot 10^{-10}$, $b = 17,161$; для керамического кирпича — $a = 1,341 \cdot 10^{-10}$, $b = 14,7$; для цементно-песчаного раствора — $a = 4,635 \cdot 10^{-12}$, $b = 62,3$.

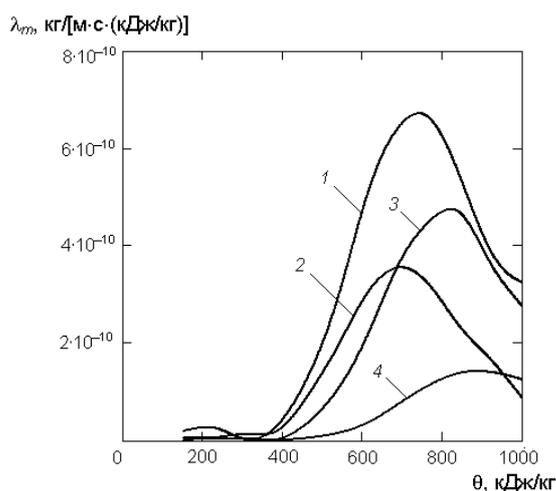


Рис. 4. Графики зависимости $\lambda_m(\theta)$ при $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$: 1 — газосиликат; 2 — силикатный кирпич; 3 — керамический кирпич; 4 — цементно-песчаный раствор

На основании полученных данных определены значения влагопроводности λ_m для указанных материалов. Из графиков зависимости $\lambda_m(\theta)$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ видно (рис. 4), что в адсорбционно-капиллярной зоне влагопроводность меняется незначительно. Это объясняется тем, что адсорбированная влага прочно связана со скелетом материала и малоподвижна. Рост подвижности капиллярно-связанной влаги приводит к увеличению влагопроводности. В дальнейшем влагопроводность материалов уменьшается за счет ослабления действия капиллярных сил. Значение коэффициента влагообмена $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})]$, полученное из экспе-

римента, можно использовать в практике расчетов влагообмена в помещении. На наружной поверхности конструкции, основываясь на рекомендациях К.Ф. Фокина, можно принять $\alpha_m^{se} = 10,4 \cdot 10^{-9}$ кг/[м²·с·(кДж/кг)].

В отличие от методов на впитывание, требующих для проведения эксперимента от трех месяцев до полугода, сушка материалов при температуре 20 °С происходит за несколько суток. По сравнению с методом В.Д. Ермоленко разработанная методика дает возможность получить из одного опыта все искомые характеристики влагопереноса в широком диапазоне влажности. Проведение эксперимента на разрезных образцах материалов существенно повышает точность результатов исследований.

На основе теоретических представлений о движении влаги в материалах получена формула, учитывающая влияние температуры на теплопроводность материалов ($-20 \leq t \leq 30$ °С):

$$\lambda_m = \frac{1,044 (1 - 0,0020 t)}{\exp \left[\sum_{i=0}^5 a_i \left(\frac{100}{t + 273,15} \right)^i \right]} \lambda_{m0}, \quad (6)$$

где $a_0 = -1,1469663 \cdot 10^1$; $a_1 = 1,43659564 \cdot 10^2$; $a_2 = -9,97411315 \cdot 10^2$; $a_3 = 3,74665106 \cdot 10^3$; $a_4 = -7,02407628 \cdot 10^3$; $a_5 = 5,39493001 \cdot 10^3$.

В диссертации выполнена оценка влияния влажности на характеристики состояния и переноса теплоты в материалах ограждений.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований характеристик состояния и переноса влаги в строительных материалах использованы для моделирования влаготеплопереноса в ограждающих конструкциях.

2. Методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности материалов при стационарных граничных условиях.

Расчет профиля влагосодержания. Основой данного метода являются линейные распределения температуры $t(x)$ и абсолютного потенциала влажности $\theta(x)$ в конструкции:

$$t(x) = t_{int} - \frac{t_{int} - t_{ext}}{R_h^{con}} R_h(x); \quad (7)$$

$$\theta(x) = \theta_{int} - \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{R_m^{con}} R_m(x). \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) использованы следующие обозначения: $R_h(x)$, $R_m(x)$ — соответственно сопротивление тепло- и влагопередаче до рассматриваемого сечения x ; R_h^{con} , R_m^{con} — соответственно общее сопротивление тепло- и влагопередаче ограждения.

Формулы (7) и (8) получены на основе решения уравнений тепло- и влагопереноса в любом слое конструкции.

Используя распределение $t(x)$, по формуле (3) определяют значения максимального сорбционного потенциала влажности $\theta_{m.s}(x)$. На основе полученных распределений $\theta(x)$ и $\theta_{m.s}(x)$ по формуле (2) определяют распределение относительного потенциала влажности $\theta_\phi(x)$. С помощью полученных в диссертации зависимостей $w(\theta_\phi)$ материалов определяют искомое распределение влагосодержания $w(x)$ по толщине многослойной конструкции.

Указанный метод дает общую оценку влажностного режима конструкций. Предлагаемый метод удобен для предварительной оценки эксплуатационной пригодности ограждений.

Определение плоскости наибольшего увлажнения. Под плоскостью наибольшего увлажнения понимается сечение в ограждении, в котором происходит наибольшее сверхсорбционное увлажнение материалов. Условие сверхсорбционного увлажнения материалов ограждающей конструкции имеет вид:

$$\theta > \theta_{m.s}. \quad (9)$$

В плоскости наибольшего увлажнения отмечается наибольшее отклонение θ от максимального сорбционного потенциала влажности $\theta_{m.s}$. Алгоритм расчета состоит в следующем. Вводится функция $\Phi(x) = \theta(x) - \theta_{m.s}(x)$, которая исследуется на экстремум внутри каждого слоя конструкции (координатная ось расположена перпендикулярно слоям конструкции с началом на внутренней поверхности первого слоя). Затем из множества локальных экстремумов и точек, лежащих на границах с окружающей средой и на стыках материалов, выбирается значение x (при $\Phi(x) > 0$), при котором $\Phi(x)$ принимает наибольшее значение. Это и есть плоскость наибольшего увлажнения конструкции.

Указанный метод позволяет определить наиболее опасное в отношении влажностного режима сечение конструкции без построения профилей влагосодержания. Метод научно обоснован, детально разработан и доведен до практической реализации в компьютерной программе «Наибольшее увлажнение конструкций (НУК)». В отличие от существующих методов расчета разработанный метод позволяет выполнить оценку защиты ограждающих конструкций от переувлажнения в широком диапазоне влажности, дает количественную характеристику степени переувлажнения материалов и применим к расчету ограждений с мультizonальной конденсацией влаги.

Расчет конструкции по предельно допустимому состоянию увлажнения. Для оценки влагозащитных свойств многослойных ограждающих конструкций в широком диапазоне увлажнения предлагается использовать сопротивление влагопереносу R_m .

Критерием обеспечения влагозащитных свойств ограждения является условие:

$$R_m^{des} \geq R_m^{req}, \quad (10)$$

где R_m^{des} — расчетное сопротивление влагопереносу, определяемое в пределах от внутреннего воздуха до плоскости наибольшего увлажнения; R_m^{req} — нормируемое сопротивление влагопереносу ограждения.

На основе баланса влаги для увлажняемого слоя конструкции за расчетный период получена формула для определения нормируемого сопротивления влагопереносу ограждающей конструкции:

$$R_m^{req} = \frac{86400 m (\theta_{int} - \theta_{m.s}) \Delta \tau_c}{k_\theta c_{m\phi} \rho_m \delta_m \Delta \theta_\phi^{max}}, \quad (11)$$

где $m = 1 - q_{me}/q_{mi}$ — коэффициент увлажнения ($0 \leq m \leq 1$); q_{mi} , q_{me} — соответственно поверхностная плотность потока влаги, входящего в конструкцию до плоскости наибольшего увлажнения и выходящего из нее; $\Delta \tau_c$ — расчетный период, принимаемый равным наиболее холодному месяцу года; $k_\theta = (\theta_\phi^{av} - \theta_{\phi 0})/(\theta_\phi^{max} - \theta_{\phi 0})$ — коэффициент влагонакопления в увлажняемом слое за расчетный период ($0 \leq k_\theta \leq 1$); θ_ϕ^{av} — среднеинтегральное значение относительного потенциала влажности в увлажняемом слое; $\theta_{\phi 0}$ — значение относительного потенциала влажности в начале периода влагонакопления; θ_ϕ^{max} — максимальное значение относительного потенциала влажности в плоскости наибольшего увлажнения; $c_{m\phi}$ — удельная относительная влагоемкость материала увлажняемого слоя; ρ_m , δ_m — соответственно плотность и толщина материала увлажняемого слоя; $\Delta \theta_\phi^{max} = \theta_\phi^{max} - \theta_{\phi 0}$ — приращение относительного потенциала влажности в плоскости наибольшего увлажнения за расчетный период. Если условие (10) выполняется, то ограждающая конструкция отвечает требованию по предельно допустимому состоянию увлажнения. В противном случае требуется корректировка конструкции.

Достоинством разработанных в диссертации методов инженерной оценки температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности является возможность расчета многослойных ограждающих конструкций при стационарных граничных условиях в широком диапазоне влажности материалов — как в сорбционной, так и в сверхсорбционной зоне увлажнения. Наглядность и простота методов делает их доступными широкому кругу специалистов.

3. Метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе математической модели совместного нестационарного тепловлагопереноса.

Математическая модель рассматриваемого процесса описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка параболического типа с переменными коэффициентами:

$$C_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div} [\lambda_h(t, \theta) \nabla t], \quad (12)$$

$$C_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \text{div} [\lambda_m(t, \theta) \nabla \theta]. \quad (13)$$

Тепловлагообмен на границе поверхности ограждения с окружающей средой описывается граничными условиями третьего рода:

на внутренней поверхности

$$\lambda_h(t, \theta) \nabla t_{si} + \alpha_h^{si} [t_{int}(\tau) - t_{si}(\tau)] = 0, \quad (14)$$

$$\lambda_m(t, \theta) \nabla \theta_{si} + \alpha_m^{si} [\theta_{int}(\tau) - \theta_{si}(\tau)] = 0; \quad (15)$$

на наружной поверхности

$$\lambda_h(t, \theta) \nabla t_{se} + \alpha_h^{se} [t_{se}(\tau) - t_{ext}(\tau)] = 0, \quad (16)$$

$$\lambda_m(t, \theta) \nabla \theta_{se} + \alpha_m^{se} [\theta_{se}(\tau) - \theta_{ext}(\tau)] = 0. \quad (17)$$

Тепловлагообмен на стыках материалов ограждения описывается граничными условиями четвертого рода:

по температуре и тепловому потоку

$$t_1(\tau) = t_2(\tau), \quad q_{h_1}(\tau) = q_{h_2}(\tau); \quad (18)$$

по потенциалу влажности и потоку влаги

$$\theta_1(\tau) = \theta_2(\tau), \quad q_{m_1}(\tau) = q_{m_2}(\tau). \quad (19)$$

Распределение температуры и абсолютного потенциала влажности в начальный момент времени ($\tau = 0$) задается начальными условиями:

$$t(x, y, z, 0) = t_0(x, y, z), \quad \theta(x, y, z, 0) = \theta_0(x, y, z). \quad (20)$$

Вывод дифференциальных уравнений тепло- и влагопроводности основан на применении закона сохранения энергии и массы к бесконечно малому элементу среды с учетом потоков тепла и влаги через поверхность этого элемента, а также выделения или поглощения тепловой энергии и массы влаги в объеме этого элемента.

Поскольку абсолютный потенциал влажности θ характеризует влажностное состояние материалов в неизотермических условиях, а влагопередача определяется $\nabla \theta$, то уравнение влагопроводности для ограждающих конструкций принято без дополнительных источников (стоков) влаги. Теплоту фазовых переходов влаги в уравнении теплопроводности можно также не учитывать, так как вклад этой теплоты в температурное поле сравним с ошибкой за счет осреднения многолетних климатических данных.

В развернутом виде система дифференциальных уравнений тепловлагопереноса в прямоугольной декартовой системе координат имеет вид:

$$C_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial z} \right], \quad (21)$$

$$C_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]. \quad (22)$$

Решением этой системы с краевыми условиями являются температурное поле $t(x, y, z, \tau)$ и поле абсолютного потенциала влажности $\theta(x, y, z, \tau)$, по которым определяется поле влагосодержания $w(x, y, z, \tau)$.

Взаимное влияние процессов переноса теплоты и влаги учитывается зависимостью коэффициентов $C_h(t, \theta)$, $\lambda_h(t, \theta)$, $C_m(t, \theta)$, $\lambda_m(t, \theta)$ от температуры и абсолютного потенциала влажности в уравнениях (21), (22).

Уравнение влагопроводности (22) идентично по форме уравнению теплопроводности (21), что позволяет использовать хорошо разработанные методы теории теплопроводности к решению задачи влаготеплопереноса и построить эффективный алгоритм решения.

Каждое из этих уравнений может быть записано в обобщенном виде:

$$C \frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial z} \right), \quad (23)$$

где C — объемная теплоемкость (влагоемкость);

U — температура (абсолютный потенциал влажности);

λ — теплопроводность (влагопроводность).

Для численного решения уравнения (23) использован метод конечных разностей. На основе интегро-интерполяционного метода на неравномерной пространственно-временной сетке ω_{ht} получена неявная разностная схема:

$$\begin{aligned} C_{i,j,k} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n}{\Delta \tau} = & \\ = \frac{1}{h_x} \left(\lambda_x^{(+0,5)} \frac{U_{i+1,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_x^{(+0,5)}} - \lambda_x^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i-1,j,k}^{n+1}}{h_x^{(-0,5)}} \right) + & \\ + \frac{1}{h_y} \left(\lambda_y^{(+0,5)} \frac{U_{i,j+1,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_y^{(+0,5)}} - \lambda_y^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j-1,k}^{n+1}}{h_y^{(-0,5)}} \right) + & \\ + \frac{1}{h_z} \left(\lambda_z^{(+0,5)} \frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_z^{(+0,5)}} - \lambda_z^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k-1}^{n+1}}{h_z^{(-0,5)}} \right). & \end{aligned} \quad (24)$$

Отличительной особенностью разностной схемы (24) является использование сеточного шаблона с узлами внутри материальных ячеек конструкции (рис. 5), что существенно снижает объем вычислительной работы.

Добавляя к этой схеме краевые условия на сетке, получим разностную задачу для математической модели (12)–(20).

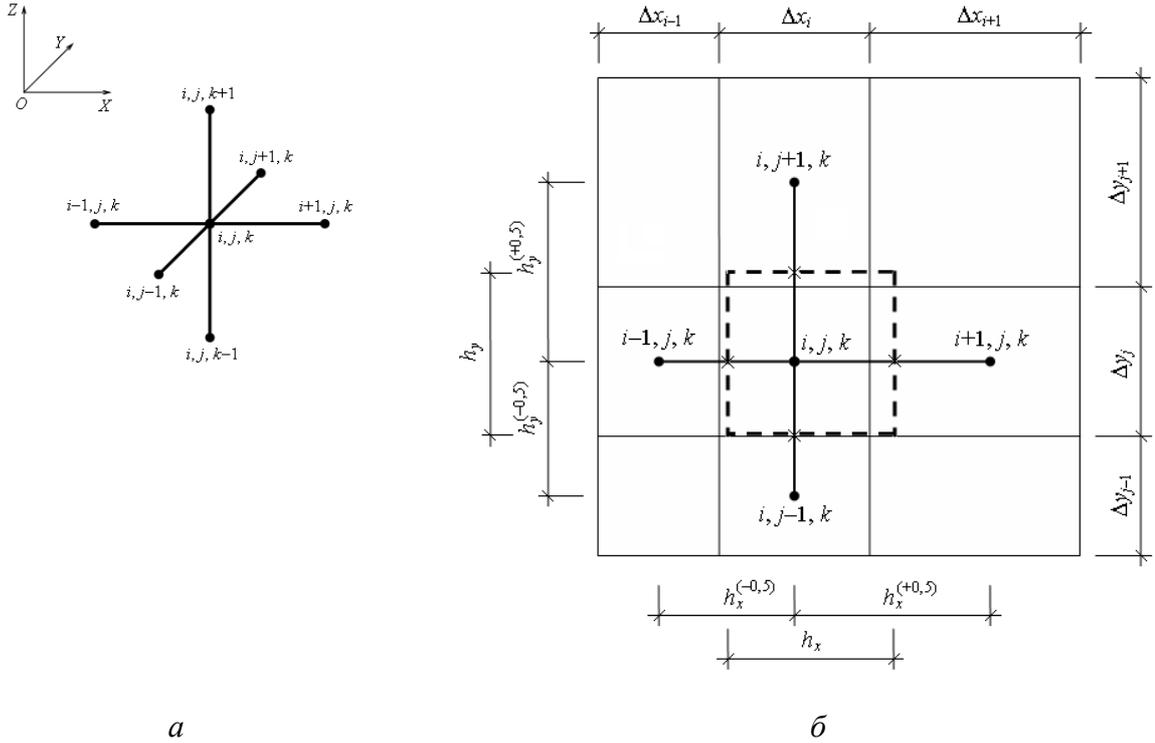


Рис. 5. Схема сеточного шаблона для конечно-разностной аппроксимации уравнения (23): *a* — общий вид; *б* — проекция на плоскость *OXY*

Для построения алгоритма решения задачи разностная схема (24) записана на шаблоне сопротивлений теплопереносу (влагопереносу):

$$\begin{aligned}
 C_{i,j,k} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n}{\Delta\tau} = & \frac{1}{h_x} \left(\frac{U_{i+1,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{R_x^{(+0,5)}} - \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i-1,j,k}^{n+1}}{R_x^{(-0,5)}} \right) + \\
 & + \frac{1}{h_y} \left(\frac{U_{i,j+1,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{R_y^{(+0,5)}} - \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j-1,k}^{n+1}}{R_y^{(-0,5)}} \right) + \\
 & + \frac{1}{h_z} \left(\frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{R_z^{(+0,5)}} - \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k-1}^{n+1}}{R_z^{(-0,5)}} \right). \quad (25)
 \end{aligned}$$

Переход к разностной схеме (25) позволяет записать разностные уравнения одинаково для всех узлов сетки, включая граничные узлы. Реализация этой схемы получена методом расщепления, разработанным Н.Н. Яненко. При этом исходную многомерную схему (25) заменяют последовательностью одномерных схем по различным направлениям в пространстве:

$$C_{i,j,k} \frac{\hat{U}_{i,j,k} - U_{i,j,k}^n}{\Delta\tau} = \frac{1}{h_x} \left(\frac{\hat{U}_{i+1,j,k} - \hat{U}_{i,j,k}}{R_x^{(+0,5)}} - \frac{\hat{U}_{i,j,k} - \hat{U}_{i-1,j,k}}{R_x^{(-0,5)}} \right), \quad (26)$$

$$C_{i,j,k} \frac{\hat{U}_{i,j,k} - \hat{U}_{i,j,k}}{\Delta\tau} = \frac{1}{h_y} \left(\frac{\hat{U}_{i,j+1,k} - \hat{U}_{i,j,k}}{R_y^{(+0,5)}} - \frac{\hat{U}_{i,j,k} - \hat{U}_{i,j-1,k}}{R_y^{(-0,5)}} \right), \quad (27)$$

$$C_{i,j,k} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - \hat{U}_{i,j,k}}{\Delta\tau} = \frac{1}{h_z} \left(\frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{R_z^{(+0,5)}} - \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k-1}^{n+1}}{R_z^{(-0,5)}} \right). \quad (28)$$

Последовательно решая алгебраические уравнения (26)–(28), находят приближенные значения потенциала на новом временном слое $\tau = \tau^{n+1}$ по известным значениям потенциала на предыдущем слое $\tau = \tau^n$. Значения \hat{U} и \hat{U} , полученные при решении уравнений (26) и (27) по направлениям OX и OY , являются промежуточными. Полная аппроксимация достигается при решении уравнения (28) по направлению OZ . Пересчет характеристик состояния и переноса тепла и влаги производится после решения полного цикла уравнений (26)–(28). Схема безусловно устойчива, равномерно сходится и имеет погрешность аппроксимации

$$\max_{\omega_h} \left| U_{i,j,k}^n - U^n \right| = O \left[\left(h_x^2 + h_y^2 + h_z^2 \right) + \Delta\tau \right].$$

Каждое из алгебраических уравнений (26)–(28) приводят к каноническому виду:

$$a_x^{(-0,5)} \hat{U}_{i-1,j,k} + a_x \hat{U}_{i,j,k} + a_x^{(+0,5)} \hat{U}_{i+1,j,k} = b_x, \quad (29)$$

$$a_y^{(-0,5)} \hat{U}_{i,j-1,k} + a_y \hat{U}_{i,j,k} + a_y^{(+0,5)} \hat{U}_{i,j+1,k} = b_y, \quad (30)$$

$$a_z^{(-0,5)} U_{i,j,k-1}^{n+1} + a_z U_{i,j,k}^{n+1} + a_z^{(+0,5)} U_{i,j,k+1}^{n+1} = b_z, \quad (31)$$

где a_x , a_y , a_z , $a_x^{(\pm 0,5)}$, $a_y^{(\pm 0,5)}$, $a_z^{(\pm 0,5)}$ — матричные коэффициенты; b_x , b_y , b_z — определяющие векторы.

Матричные коэффициенты в (29)–(31) определяются по формулам:

$$a_x = 1 + \frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k} h_x} \left(\frac{1}{R_x^{(+0,5)}} + \frac{1}{R_x^{(-0,5)}} \right);$$

$$a_y = 1 + \frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k} h_y} \left(\frac{1}{R_y^{(+0,5)}} + \frac{1}{R_y^{(-0,5)}} \right);$$

$$a_z = 1 + \frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k} h_z} \left(\frac{1}{R_z^{(+0,5)}} + \frac{1}{R_z^{(-0,5)}} \right);$$

$$a_x^{(-0,5)} = -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k} h_x R_x^{(-0,5)}}; \quad a_x^{(+0,5)} = -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k} h_x R_x^{(+0,5)}};$$

$$a_y^{(-0,5)} = -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_yR_y^{(-0,5)}}; \quad a_y^{(+0,5)} = -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_yR_y^{(+0,5)}};$$

$$a_z^{(-0,5)} = -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_zR_z^{(-0,5)}}; \quad a_z^{(+0,5)} = -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_zR_z^{(+0,5)}}.$$

Матричные коэффициенты характеризуют связь отдельных элементов ограждающей конструкции. В каждом из уравнений (29)–(31) они образуют трехдиагональную матрицу коэффициентов. Определяющие векторы в (29)–(31), содержащие краевые условия, вычисляются по формулам:

$$b_x = U_{i,j,k}^n; \quad b_y = \hat{U}_{i,j,k}; \quad b_z = \hat{U}_{i,j,k}.$$

Для решения уравнений (29)–(31) использован метод прогонки.

Предлагаемая математическая модель реализована в компьютерной программе «Совместный влаготеплоперенос (СОВТ-3)», разработанной автором в системе визуального объектно-ориентированного программирования Delphi 3–7 для WINDOWS®. Основными достоинствами модели и компьютерной программы являются: использование шкалы неизотермического абсолютного потенциала влажности, что позволяет упростить математическую модель тепловлагоденоса и дает возможность производить расчет в широком диапазоне влажности материалов; возможность исследования динамики температурно-влажностного режима ограждений сложной геометрической структуры при переменных воздействиях климата и микроклимата помещений; применимость для исследования тепловых и влажностных процессов различной интенсивности; возможность задания неравномерной пространственно-временной сетки для оптимизации вычислительного процесса.

Применение компьютерной программы проиллюстрировано на примере расчета температурно-влажностного режима фрагмента трехслойной стеновой панели со шпоночным соединением в годовом цикле (рис. 6, 7).

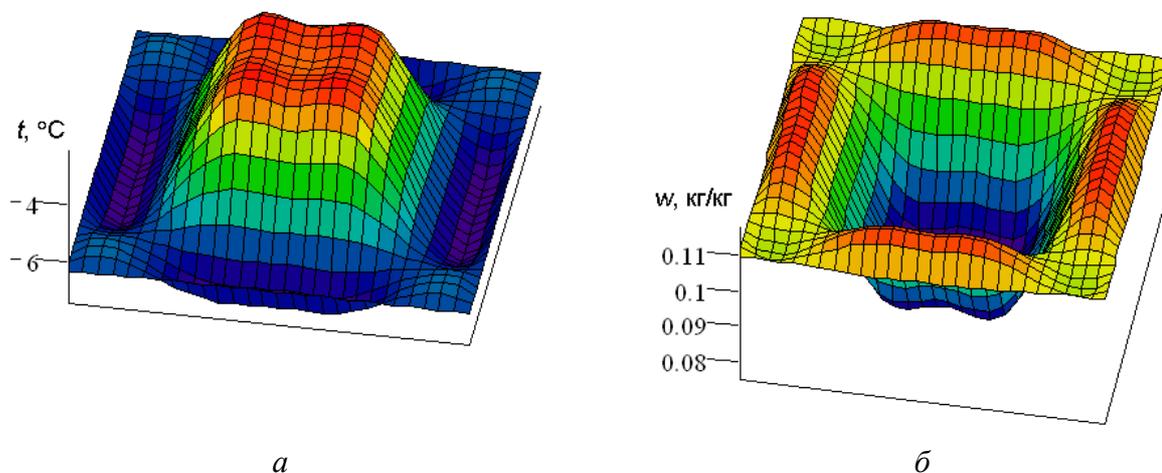


Рис. 6. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем (по керамзитобетону) в середине января (48° с.ш., 44° в.д.)

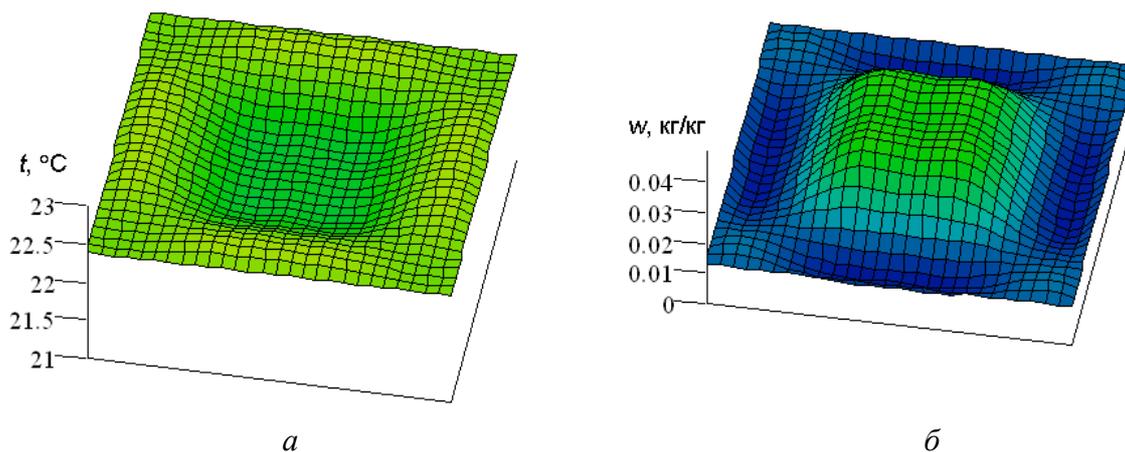


Рис. 7. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем (по утеплителю) в середине июля (48° с.ш., 44° в.д.)

Наличие экстремумов по температуре и влагосодержанию (рис. 6) физически обусловлено неоднородностью рассматриваемого фрагмента конструкции и нелинейностью процесса влаготеплопереноса.

В диссертации проведена верификация разработанного метода расчета различными способами: на аналитическом решении и последовательности пространственных и временных сеток, на различных математических моделях влаготеплопереноса, на результатах проведенных автором натурных исследований параметров микроклимата помещений, температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Верификация разработанного автором метода расчета подтверждает его достоверность, что позволяет использовать этот метод в проектной практике. Численные значения показателей, подтверждающих достоверность, приведены в диссертационной работе.

На основании полученных автором результатов тепловизионного обследования (рис. 8) выполнена оценка влияния краевых зон ограждающих конструкций на температурно-влажностный режим помещений (табл. 1).



Рис. 8. Термограмма на внутренней поверхности ограждений жилого помещения

Анализ результатов показывает локальное понижение температуры в краевых зонах ограждений. Результирующая температура помещения согласно данным измерений составляет 19 °С. Фактический перепад температур между внутренним воздухом и внутренней поверхностью стены, приведенный к расчетным условиям, превышает нормируемое значение. Минимальная температура на

внутренней поверхности стены ниже точки росы внутреннего воздуха, что приводит к выпадению конденсата в краевой зоне при расчетных условиях.

Сравнение рассчитанных и измеренных параметров микроклимата жилого помещения

Параметр	Фактическое (измеренное) значение параметра	Рассчитанное значение параметра	
		без учета краевых зон	с учетом краевых зон
Результирующая температура помещения, °С	19	19,5	19
Температурный перепад, °С, между внутренним воздухом и внутренней поверхностью стены	4,1	1,8	4
Минимальная температура на внутренней поверхности стены, °С	8,3	—	8,4

Из табл. 1 видно, что неучет краевых зон ограждений при теплотехническом проектировании зданий завышает результирующую температуру помещения на 2,6%. Вместе с тем, неучет краевых зон приводит к занижению перепада температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружной стены на 56%, искажает оценку комфортных условий в помещении и создает существенные риски при оценке санитарно-гигиенического требования по условию недопустимости конденсации влаги на внутренней поверхности ограждений. Учет краевых зон на основе разработанных в диссертации методов расчета температурно-влажностного режима позволяет достичь практически полного совпадения рассчитанных и измеренных параметров микроклимата помещений (табл. 1), обеспечивая высокую точность результатов исследований и повышая качество проектирования.

Разработанный в диссертации метод численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепловлагодиффузионного переноса позволяет прогнозировать температурно-влажностный режим ограждений с целью энергосбережения и повышения надежности и теплотехнической безопасности зданий.

4. Методики расчета теплозащитных и энергетических характеристик здания за отопительный период с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций.

Для оценки влияния краевых зон на теплозащитные свойства ограждений разработана методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах. Для ограждающей конструкции, содержащей l краевых зон, приведенное сопротивление теплопередаче определяется по формуле:

$$R_h^{des} = \frac{R_h^{con}}{1 + \frac{1}{A} \sum_{i=1}^l k_i^{ez} A_i^{ez}}, \quad (32)$$

где k_i^{ez} , A_i^{ez} — соответственно коэффициент влияния и площадь зоны влияния i -й краевой зоны.

Под зоной влияния теплотехнически неоднородного участка ограждения (краевой зоны) понимается область локального нарушения однородности температурного поля конструкции, вызванного этой краевой зоной. Коэффициент влияния характеризует добавочный тепловой поток через краевую зону конструкции, отнесенный к тепловому потоку по глади в пределах площади зоны влияния краевой зоны. Параметры k_i^{ez} , A_i^{ez} определяются на основе расчета температурно-влажностного режима по температурному полю.

Указанная методика позволяет оценить влияние краевых зон на теплозащитные свойства ограждающих конструкций путем сравнения приведенного сопротивления теплопередаче, определяемого по формуле (32), с нормируемым значением.

Разработанная в диссертации методика позволяет учесть влияние влажности на температурное поле конструкции, нестационарность температурно-влажностного режима, трехмерность температурного и влажностного полей, что находится в мировом тренде с программой энергосбережения в зданиях.

Для широко применяемых в практике строительства ограждений, содержащих краевые зоны выполнен расчет температурно-влажностного режима по компьютерной программе «СОВТ–3». На основании результатов расчета (рис. 9—11) дана оценка влияния краевых зон на теплозащитные свойства ограждающих конструкций.

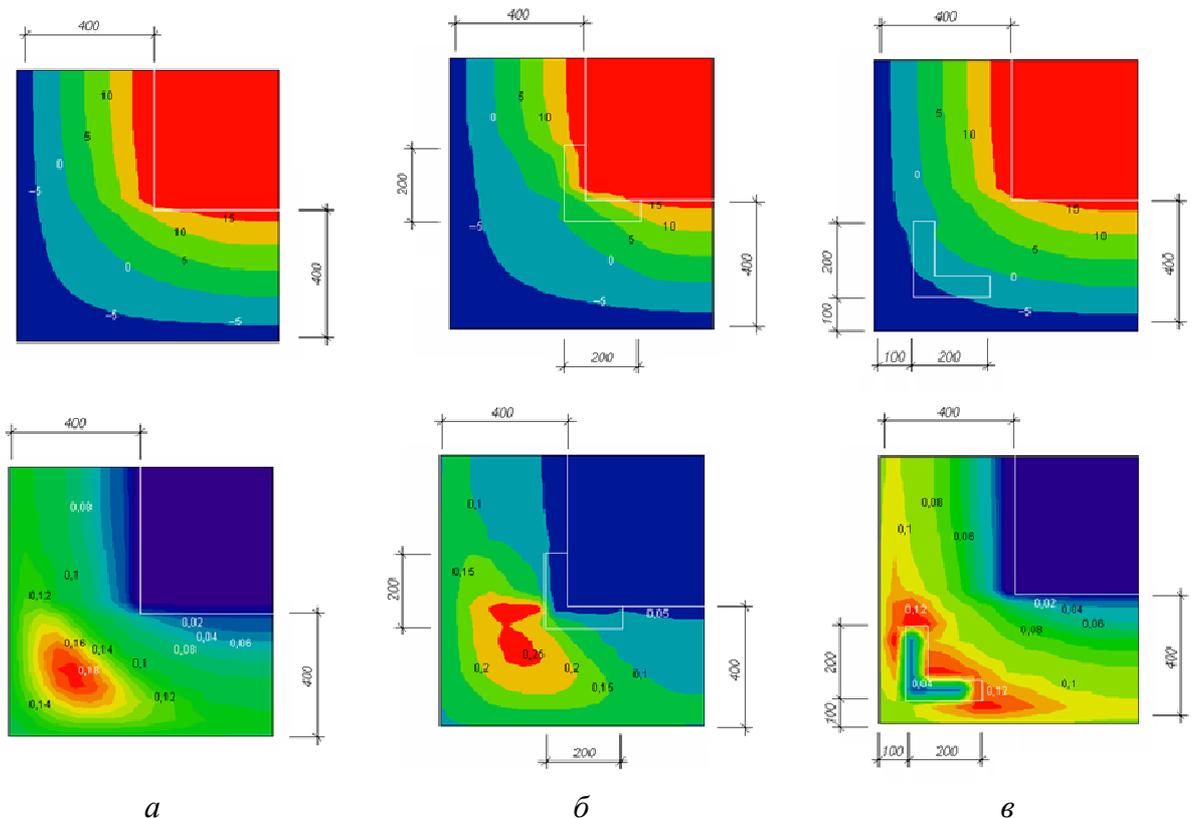


Рис. 9. Поля температуры (вверху) и влагосодержания (внизу) в наружном углу легкобетонных стен: *а* — без теплоизоляционного вкладыша; *б* — с теплоизоляционным вкладышем у внутренней поверхности угла; *в* — то же, у наружной поверхности угла

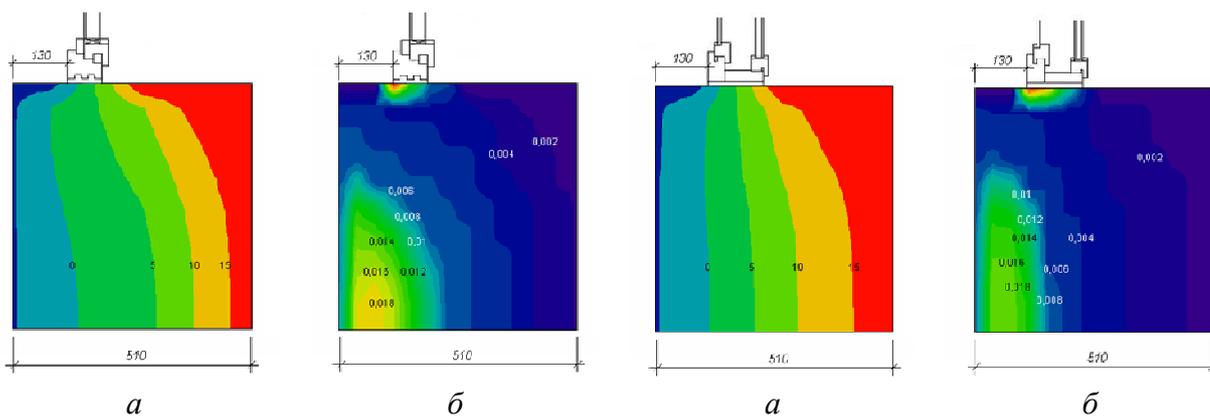


Рис. 10. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) в узле сопряжения оконного блока с наружной стеной (слева — с узкой коробкой, справа — с широкой коробкой)

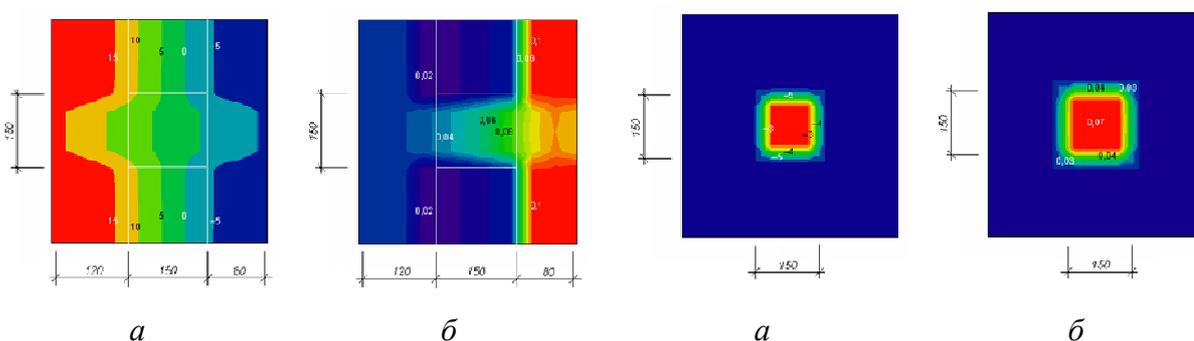


Рис. 11. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) в трехслойной стеновой панели (слева — сечении по стволу шпонки, справа — на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем)

В диссертации показано, что для всех видов рассматриваемых конструкций в краевых зонах отмечается локализация температуры и влагосодержания с образованием сложных краевых эффектов, обусловленных совместным влиянием процессов тепло- и влагопереноса. Ухудшение температурно-влажностного режима в краевых зонах приводит к снижению теплозащитных свойств конструкций. Максимальное снижение теплозащитных свойств (47%) отмечается в углу наружных стен с размещением теплоизоляционного вкладыша у внутренней поверхности.

Полученные результаты использованы для оценки влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплозащитные свойства оболочки здания.

Для оболочки здания, состоящей из m ограждающих конструкций ($m \geq 1$), приведенное сопротивление теплопередаче определяется по формуле:

$$R_{he}^{des} = \frac{A_e^{sum}}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i A_i}{R_{hi}^{des}}}, \quad (33)$$

где n_i — коэффициент, учитывающий положение i -й ограждающей конструкции относительно внутреннего и наружного воздуха.

На основе разработанной методики выполнена оценка теплозащиты для проекта 17-этажного жилого здания при следующих вариантах расчета: 1 — без учета краевых зон (базовый); 2 — с учетом краевых зон (табл. 2).

Таблица 2

Сопrotивление теплопередаче ограждающих конструкций оболочки здания

Ограждающая конструкция	Площадь, м ²	Сопrotивление теплопередаче, м ² ·К/Вт	
		по базовому варианту	с учетом краевых зон
Наружные стены	4494	4,06	2,16
Окна, балконные двери	1576	0,68	0,59
Входные двери	55	0,78	0,78
Покрытие совмещенное	412	4,22	3,38
Перекрытие теплого чердака	381	3,68	2,94
Перекрытие над техподпольем	793	3,68	2,94

Сопrotивление теплопередаче оболочки здания: по базовому варианту — 1,97 м²·К/Вт, с учетом краевых зон — 1,44 м²·К/Вт. Снижение приведенного сопrotивления теплопередаче оболочки здания по сравнению с базовым вариантом составляет 26,9%.

Для оценки влияния краевых зон на энергетические характеристики зданий разработана методика расчета энергетических показателей здания за отопительный период с использованием удельного расхода энергии на эксплуатацию здания за отопительный период, определяемого по формуле:

$$q = q_h + q_{hw} + q_e, \quad (34)$$

где q_h , q_{hw} , q_e — соответственно удельный расход тепловой энергии на отопление, горячее водоснабжение и электрической энергии (прямой или приведенной к тепловому эквиваленту) за отопительный период.

Расчет составляющих q_h , q_{hw} и q_e выполнен на основе СТО 17532043–001–2005 и СП 50.13330 и приведен в диссертации.

Удельный расход тепловой энергии на отопление определяют на основе теплового баланса здания за отопительный период по формуле:

$$q_h = q_{tr} + q_a - \eta(q_{int} + q_s), \quad (35)$$

где q_{tr} , q_a , q_{int} , q_s — соответственно удельные трансмиссионные теплотери через оболочку здания, удельные теплотери за счет инфильтрации и вентиляции воздуха, удельные внутренние бытовые тепловыделения, удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации; $\eta \leq 1$ — коэффициент использования тепlopоступлений в здание.

Влияние краевых зон ограждающих конструкций на удельный расход энергии учитывается при расчете удельных трансмиссионных потерь теплоты q_{tr} . Общие трансмиссионные тепlopотери через ограждающую конструкцию складываются из основных тепlopотерь по глади и добавочных тепlopотерь через все краевые зоны ограждения и определяются по формуле:

$$Q_T = \frac{0,0864M_{ht}A}{R_h^{con}} \left(1 + \sum_{j=1}^l \psi_j \right). \quad (36)$$

где l — число краевых зон; $\psi_j = k_j^{ez} A_j^{ez} / A$ — коэффициент добавочных теплопотерь через j -ю краевую зону.

Формула (36) позволяет рассчитать общие теплопотери ограждения с учетом краевых зон и оценить вклад каждой краевой зоны в потери теплоты.

Для оболочки здания, состоящей из m ограждающих конструкций ($m \geq 1$), удельные трансмиссионные теплопотери определяют по формуле:

$$q_{tr} = \frac{1}{V_h} \sum_{i=1}^m Q_{Ti}, \quad (37)$$

где Q_{Ti} — общие трансмиссионные теплопотери через i -ю конструкцию.

Предложенная методика реализована в компьютерной программе «Энергетический паспорт здания (ЭНПАС)», разработанной автором в системе визуального объектно-ориентированного программирования Delphi 3–7 для WINDOWS®. Основными достоинствами компьютерной программы являются: расчет энергопотребления здания с учетом всех его составляющих, включая расходы тепловой и электрической энергии; определение структуры трансмиссионных теплопотерь через краевые зоны ограждений, что позволяет совершенствовать проектные решения; возможность оценки энергоэффективности здания на стадии проектирования.

На примере проекта того же здания в диссертации показано, что температурно-влажностный режим в краевых зонах ограждений оказывает существенное влияние на энергетические характеристики здания. Учет краевых зон ограждающих конструкций повышает удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания на 37%, расход тепловой энергии на отопление на 32%, расход энергии на эксплуатацию здания на 13%. Совершенствование конструктивного решения наружных ограждений приводит к снижению удельных трансмиссионных теплопотерь через оболочку здания на 29%, расхода тепловой энергии на отопление на 25%, расхода энергии на эксплуатацию здания на 10%. Таким образом, совершенствование краевых зон ограждающих конструкций оболочки здания имеет высокий потенциал энергоэффективности.

С целью подтверждения достоверности разработанных в диссертации методик выполнена оценка энергоэффективности высотного 23-этажного эксплуатируемого жилого здания по результатам энергоаудита, проведенного автором. На момент проведения энергоаудита продолжительность эксплуатации здания составила около 5 лет. Измерение и регистрация потребления тепловой энергии на отопление здания выполнены экспресс-методом согласно ГОСТ 31168–2014. Мониторинг расходов тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение производился в автоматическом режиме один раз в сутки по общедомовому теплосчетчику. Измерение расхода электроэнергии

производилось поквартирно, с учетом показаний общедомового счетчика. Полученные результаты измерений использованы для тестирования методики расчета энергетических показателей здания (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение расчетных и фактических удельных энергетических показателей здания

Показатель	Значение показателя, МДж/(м ³ ·г.)		Отклонение расчетного значения показателя от фактического, %
	фактическое	расчетное	
Расход тепловой энергии на отопление здания	94,5	92,4	-2,2
Расход тепловой энергии на горячее водоснабжение	29,2	27,3	-6,5
Расход электрической энергии	22,2	24,1	+8,6
Итого	146	144	-1,4

Сравнение расчетных значений энергетических показателей, полученных по предлагаемой методике с фактическими данными, подтверждает достоверность методики. Таким образом, учет краевых зон в ограждениях позволяет более точно оценить теплозащитные и энергетические характеристики зданий за отопительный период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных автором исследований в диссертации решена крупная научная проблема *повышения теплозащиты и энергоэффективности зданий разработкой научно-методического аппарата по формированию требований к ограждающим конструкциям с учетом особенностей температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений*, имеющая важное хозяйственное значение.

Диссертация соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденным Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года № 899, п. 8 «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Основные выводы по работе:

1. Разработаны теоретические основы состояния и переноса влаги в материалах ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при неизотермических условиях увлажнения. На основе термодинамического анализа процессов переноса влажного пара в материалах ограждающих конструкций предложена энергетическая шкала абсолютного потенциала влажности. На основе установленной связи между различными шкалами потенциала влажности показано, что абсолютный потенциал влажности является характеристикой влажностного состояния материалов в неизотермических условиях. Разработана экспресс-методика экспериментального определения характеристик переноса влаги (потенциалопроводности, влагопроводности и коэффициента влагообмена) путем сушки разрезных образцов влажных ма-

териалов от полного водонасыщения, позволяющая определить из одного опыта все искомые характеристики влагопереноса. На основе теоретических представлений о движении влаги в материалах получена формула, учитывающая влияние температуры на влагопроводность материалов. Получены аналитические зависимости теплофизических характеристик влажных материалов от относительного потенциала влажности и температуры, которые позволяют учесть влияние влажности на теплозащитные свойства ограждений.

2. Разработаны методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при стационарных граничных условиях: расчет профиля влагосодержания для общей оценки влажностного режима, определение плоскости наибольшего увлажнения для выявления наиболее опасного, с точки зрения влажностного режима, сечения конструкции, расчет ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения для анализа накопления влаги в наиболее холодный месяц года. Достоинством методов является возможность расчета в широком диапазоне влажности материалов, включая сверхсорбционную зону увлажнения, а также применимость к конструкциям с мультizonальной конденсацией влаги. Наглядность и простота методов делает их доступными широкому кругу специалистов.

3. Разработан метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе математической модели совместного нестационарного тепловлагопереноса в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка параболического типа с краевыми условиями. Использование шкалы абсолютного потенциала влажности позволяет упростить модель тепловлагопереноса. Численное решение задачи получено методом конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений с применением неявной разностной схемы. Разработанная математическая модель реализована в компьютерной программе, которая позволяет производить расчет нестационарных температурных и влажностных полей в трехмерных областях ограждающих конструкций в годовом цикле в широком диапазоне влажности материалов. На основе математического моделирования нестационарного тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях показано, что в краевых зонах ограждений происходит локализация температуры и влагосодержания с образованием сложных краевых эффектов, обусловленных совместным влиянием процессов тепло- и влагопереноса. Проведена верификация указанного метода расчета различными способами: на аналитическом решении и последовательности пространственных и временных сеток, на различных математических моделях влаготеплопереноса, на результатах проведенных автором натурных исследований температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Верификация метода подтверждает его достоверность, что позволяет использовать этот метод в проектной практике.

4. Выполнена оценка влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций на теплозащитные и энергетические характеристики здания за отопительный период. Разработана методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и оболочки здания в целом с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений. Показано, что в краевых зонах ограждений теплозащитные свойства снижаются, приводя к ухудшению теплозащиты всего здания. Предложены практические рекомендации по проектированию ограждающих конструкций современных зданий с учетом температурно-влажностного режима. Разработана методика расчета энергетических показателей по зданию за отопительный период. При определении трансмиссионных теплопотерь через оболочку здания учитываются добавочные потери теплоты в краевых зонах ограждающих конструкций. На основе этой методики показано, что температурно-влажностный режим в краевых зонах ограждений оказывает существенное влияние на энергетические характеристики здания. Совершенствование конструктивного решения наружных ограждений приводит к снижению расхода энергии на эксплуатацию здания на 10%. Таким образом, снижение потерь теплоты в краевых зонах ограждающих конструкций имеет высокий потенциал энергосбережения.

Основные работы по теме диссертации

А. Научные издания, входящие в перечень рецензируемых научных изданий ВАК

1. Корниенко, С.В. Метод многофакторного прогноза температурного режима в ограждающих конструкциях зданий / С.В. Корниенко // Известия вузов. Строительство. – 2001. – № 2–3. – С. 129–132.
2. Корниенко, С.В. Температурный режим трехслойной стеновой панели / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2001. – № 9. – С. 20–21.
3. Корниенко, С.В. Потенциал влажности / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2005. – № 7. – С. 16–18.
4. Корниенко, С.В. Новая шкала потенциала влажности для материалов наружных ограждений зданий / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2005. – № 9. – С. 5–6.
5. Корниенко, С.В. Метод решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Известия вузов. Строительство. – 2006. – № 2. – С. 108–111.
6. Корниенко, С.В. Потенциал влажности для определения влажностного состояния материалов наружных ограждений в неизотермических условиях / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 88–89.
7. Корниенко, С.В. Экспериментальное исследование переноса влаги в материалах ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2007. – № 1. – С. 42–44.
8. Корниенко, С.В. Характеристики состояния влаги в материалах ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2007. – № 4. – С. 74–76.
9. Корниенко, С.В. Инженерный метод определения плоскости наибольшего увлажнения для ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2007. – № 6. – С. 50–51.
10. Корниенко, С.В. Решение трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2007. – № 10. – С. 54–55.
11. Корниенко, С.В. Метод инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе потенциала влажности / С.В. Корниенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 2. – С. 46–48.
12. Корниенко, С.В. Равновесное влагосодержание материалов в шкале потенциала влажности / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2008. – № 5. – С. 34–35.
13. Корниенко, С.В. Расчет тепловлажностного режима в краевых зонах неоднородных участков ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Вестник Международной академии холода. – 2008. – Вып. 4. – С. 12–14.
14. Корниенко, С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплотерь через краевые зоны ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 348–351.
15. Корниенко, С.В. Комплексная оценка теплозащиты ограждающих конструкций оболочки здания / С.В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 7 (33). – С. 43–49.
16. Корниенко, С.В. Оценка влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплотери здания / С.В. Корниенко // Вестник МГСУ. – 2011. – Т. 1. – № 3. – С. 359–365.
17. Корниенко, С.В. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилого здания при верификации метода расчета влаготеплопереноса в ограждающих конструкциях / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2012. – Вып. 28 (47). – С. 19–26.
18. Корниенко, С.В. Оценка энергоэффективности жилого здания по результатам энергоаудита / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2012. – № 6. – С. 19–22.

19. Корниенко, С.В. Оценка влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплозащиту и энергоэффективность зданий / С.В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 8. – С. 5–12.

20. Корниенко, С.В. Оценка влагонакопления в ограждающих конструкциях зданий в годовом цикле / С.В. Корниенко // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015. – № 4. – С. 12–17.

21. Корниенко, С.В. Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натуральных измерений параметров микроклимата помещений / С.В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – 2 (28). – С. 18–23.

22. Корниенко, С.В. Температурно-влажностный режим наружных стен с вентилируемым фасадом / С.В. Корниенко // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 389–394.

В. Научные издания, индексируемые Web of Science и Scopus

1. Korniyenko, S.V. Settlement and experimental control of energy saving for buildings / S.V. Korniyenko // Magazine of Civil Engineering. – 2013. – No. 43 (8). – pp. 24–30.

2. Korniyenko, S.V. The experimental analysis and calculative assessment of building energy efficiency / S.V. Korniyenko // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – No. 618. – pp. 509–513.

3. Korniyenko, S.V. Multifactorial forecast of thermal behavior in building envelope elements / S.V. Korniyenko // Magazine of Civil Engineering – 2014. – No. 52 (8). – pp. 25–37.

4. Korniyenko, S. Evaluation of thermal performance of residential building envelope / S. Korniyenko // Procedia Engineering. – 2015. – No. 117. – pp. 191–196.

5. Korniyenko, S.V. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks / S.V. Korniyenko, N.I. Vatin, A.S. Gorshkov // Magazine of Civil Engineering. – 2016. – No. 64 (4). – pp. 10–25.

6. Korniyenko, S. Advanced hygrothermal performance of building component at reconstruction of S. Radonezhskiy temple in Volgograd / S. Korniyenko // MATEC Web of Conferences. – 2016. – No. 53, 01003.

7. Korniyenko, S. Assessment of influence of designed building on insolation conditions of residential development / S. Korniyenko // Proceedings of the International Conference on Chemical, Material and Food Engineering. – 2015. – No. 22. – pp. 529–532.

С. Объекты интеллектуальной собственности

1. Электронная версия СНиП II–3–79* «Строительная теплотехника» (WTCODE 1.0) / С.В. Корниенко ; свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001610954 от 01.08.2001.

2. Теплоэнергетический паспорт здания (ТЕРАС 1.0) / С.В. Корниенко ; свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610358 от 18.03.2002.

3. Нестационарное температурное поле (НТП) / С.В. Корниенко ; свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610522 от 24.02.2004.

4. Совместный влаготеплоперенос (СОВТ) / С.В. Корниенко ; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611175 от 04.02.2011.

5. Энергетический паспорт здания (ЭНПАС) / С.В. Корниенко ; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610351 от 10.01.2012.

6. Наибольшее увлажнение конструкций (НУК) / С.В. Корниенко ; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619917 от 25.09.2014.

Д. Монографии

1. Корниенко, С.В. Совместный нестационарный тепло-влажноперенос в ограждающих конструкциях зданий (трехмерная задача) / С.В. Корниенко. – Волгоград, 1999. – 187 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 01.12.99, № 3568–В99.

2. Корниенко, С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплотерь в краевых зонах ограждающих конструкций / С.В. Корниенко ; Минобрнауки России. – Волгоград: ВолГАСУ, 2011. – 108 с.

3. Корниенко, С.В. Методы инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности / С.В. Корниенко ; Минобрнауки России. – Волгоград: ВолГАСУ, 2011. – 100 с.

4. Korniyenko, S. Development of energy effective civil engineering: Innovative technologies / S. Korniyenko. – LAP Lambert Academic Publishing, 2016. – 80 p.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Θ_B — экспериментальный потенциал влажности В.Н. Богословского, °В; Θ_L — изотермический потенциал влагопереноса А.В. Лыкова, °М; θ — абсолютный потенциал влажности, кДж/кг; p — парциальное давление водяного пара, Па; p_s — давление насыщенного водяного пара, Па; w — влагосодержание материала, кг/кг (% М); t — температура, °С; φ — относительная влажность воздуха; θ_φ — относительный потенциал влажности; c_m — абсолютная удельная влагоемкость материала, (кг/кг)/(кДж/кг); $c_{m\varphi}$ — относительная удельная влагоемкость материала, кг/кг; M — молярная масса воды ($M = 18,0153 \cdot 10^{-3}$ кг/моль); R — универсальная газовая постоянная [$R = 8,31451$ Дж/(моль·К)]; a_m — потенциалопроводность влаги в материале, м²/с; ρ_0 — плотность материала в сухом состоянии, кг/м³; c_h — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); C_h — объемная теплоемкость материала ($C_h = c_h \rho_0$), Дж/(м³·К); λ_h — теплопроводность материала, Вт/(м·К); C_m — объемная влагоемкость материала ($C_m = c_m \rho_0$), кг/[м³·(кДж/кг)]; λ_m — влагопроводность материала, кг/[м·с·(кДж/кг)]; R_h^{con} — общее сопротивление теплопередаче ограждения, м²·К/Вт; R_m^{con} — общее сопротивление влагопередаче ограждения, м²·с·(кДж/кг)/кг; τ — время, с; x, y, z — пространственные координаты, м; α_h — коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); α_m — коэффициент влагообмена, кг/[м²·с·(кДж/кг)]; $h_x^{(\pm 0,5)}, h_y^{(\pm 0,5)}, h_z^{(\pm 0,5)}$ — шаги между соседними узлами пространственной сетки ω_h , м; h_x, h_y, h_z — средние шаги пространственной сетки ω_h , м; $\lambda_x^{(\pm 0,5)}, \lambda_y^{(\pm 0,5)}, \lambda_z^{(\pm 0,5)}$ — сеточные коэффициенты теплопроводности (влагопроводности), Вт/(м·К), кг/[м·с·(кДж/кг)]; $R_x^{(\pm 0,5)}, R_y^{(\pm 0,5)}, R_z^{(\pm 0,5)}$ — сопротивления теплопереносу (влагопереносу) между узлами сетки ω_h , м²·К/Вт, м²·с·(кДж/кг)/кг; q_h — поверхностная плотность теплового потока, Вт/м²; q_m — поверхностная плотность потока влаги, кг/(м²·с); $\Delta\tau$ — временной шаг, с; Δh — пространственный шаг, м; V_h — отапливаемый объем здания, м³; A_e^{sum} — суммарная площадь оболочки здания (по внутренним размерам), м²; A — площадь ограждающей конструкции, м²; k^{ez}, A^{ez} — соответственно коэффициент влияния и площадь зоны влияния, м², краевой зоны; z_{ht} — продолжительность отопительного периода, сут/год; q — удельный расход энергии на эксплуатацию здания за отопительный период, МДж/(м³·год); M_{ht} — градусосутки отопительного периода, К·сут/год; $\nabla t = \mathbf{i}(\partial t/\partial x) + \mathbf{j}(\partial t/\partial y) + \mathbf{k}(\partial t/\partial z)$; $\nabla \theta = \mathbf{i}(\partial \theta/\partial x) + \mathbf{j}(\partial \theta/\partial y) + \mathbf{k}(\partial \theta/\partial z)$; $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ — единичные векторы, направленные по осям прямоугольной декартовой системы координат; *индексы*: *si, se* — внутренняя и наружная поверхности ограждения; *int, ext* — внутренний и наружный воздух; *m.s* — означает принадлежность к максимальному сорбционному увлажнению материалов; *des, req* — расчетная и нормируемая величина; *размерные коэффициенты*: $135,3 \text{ кДж/кг} = RT \cdot 10^{-3}/M = 8,31451 \cdot 293,15 \cdot 10^{-3}/(18,0153 \cdot 10^{-3})$; $86400 \text{ с/сут} = 24 \cdot 3600$; $0,0864 \text{ МДж/(Вт·сут)}$; $0,024 \text{ МДж·ч/(кДж·сут)}$.

КОРНИЕНКО СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ ЗА СЧЕТ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО
РЕЖИМА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Подписано в печать 24.09.2018. Формат 60×80 1/16

Бумага офсетная. Гарнитура таймс.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,8.

Тираж 100 экз. Заказ №